



DOI:10.12404/j.issn.1671-1815.2403250

引用格式:张斌,刘旻,刘飞禹.交通荷载作用下考虑软土软化效应的电力排管动力响应分析[J].科学技术与工程,2025,25(8):3391-3399.

Zhang Bin, Liu Min, Liu Feiyu. Dynamic response analysis of electrical conduit under traffic load considering the softening effect of soft soil [J]. Science Technology and Engineering, 2025, 25(8): 3391-3399.

# 交通荷载作用下考虑软土软化效应的 电力排管动力响应分析

张斌<sup>1</sup>, 刘旻<sup>2</sup>, 刘飞禹<sup>2\*</sup>

(1. 国家电网上海经研院, 上海 200233; 2. 上海大学力学与工程科学学院, 上海 200444)

**摘要** 为了研究交通荷载作用下考虑软土软化效应的电力排管变形机理,基于动弹性模量衰减模型,编写 USDFLD 子程序,并将该子程序导入 ABAQUS 软件中,建立软土地基中埋置电力排管的三维有限元模型,采用有限元方法对地下电力排管在交通荷载作用下的动力响应进行分析,研究不同交通荷载大小(满载 50%、满载 100%、超载 200%、超载 300%)、埋置深度(800、850、900、950 mm)对电力排管力学特性的影响。结果表明:软土的软化效应对电力排管在受交通荷载作用下的动力响应有显著影响;随着交通荷载大小的增加,电力排管的沉降逐渐增大,排管底部的应变从对称分布转向不对称分布,应变集中区域增加;增大电力排管的埋深可以显著降低交通荷载对排管的影响,当埋置深度从 800 mm 增加至 950 mm,竖向位移减小 39%。研究成果为软土地区的电力排管设计和施工提供科学依据,帮助优化排管埋置深度和应对不同交通荷载的影响。

**关键词** 交通荷载; 软化效应; 电力排管; 有限元分析

中图分类号 TU994;

文献标志码 A

## Dynamic Response Analysis of Electrical Conduit under Traffic Load Considering the Softening Effect of Soft Soil

ZHANG Bin<sup>1</sup>, LIU Min<sup>2</sup>, LIU Fei-yu<sup>2\*</sup>

(1. State Grid Shanghai Economic Research Institute, Shanghai 200233, China;

2. School of Mechanics and Engineering Science, Shanghai University, Shanghai 200444, China)

**[Abstract]** To investigate the deformation mechanism of underground electrical conduits in soft soil considering the softening effect under traffic loads, a USDFLD subroutine was developed based on the dynamic modulus attenuation model. This subroutine was imported into ABAQUS software to establish a three-dimensional finite element model of electrical conduits buried in soft soil foundations. The finite element method was used to analyze the dynamic response of underground electrical conduits under traffic loads. The effects of different traffic load magnitudes (50% full load, 100% full load, 200% overload, 300% overload) and burial depths (800, 850, 900, 950 mm) on the mechanical properties of electrical conduits were studied. The results show that the softening effect of soft soil has a significant impact on the dynamic response of electrical conduits under traffic loads. As the traffic load magnitude increases, the settlement of the electrical conduit gradually increases, and the strain at the bottom of the conduit shifts from symmetric to asymmetric distribution, with an increase in the strain concentration area. Increasing the burial depth of the electrical conduit can significantly reduce the impact of traffic loads on the conduit. When the burial depth increases from 800 mm to 950 mm, the vertical displacement decreases by 39%. The research results provide a scientific basis for the design and construction of power pipes in soft soil areas, and help optimize the depth of pipe embedding and cope with the influence of different traffic loads.

**[Keywords]** traffic load; softening effect; electrical conduit; finite element analysis

电力管线是城市基础设施的重要组成部分,是城市安全高效运行的“生命线”,任何轻微的损坏都可能导致严重的安全隐患<sup>[1]</sup>。近年来,直埋电缆敷设方式逐渐被排管敷设方式替代,其中上海中心城

区的地下电缆化率已超过 80%<sup>[2]</sup>。随着城市交通与运输业的快速发展,由交通荷载引起的地下电力排管破损问题也逐渐加剧,进而导致城市断电等风险,因此交通荷载对电力排管的扰动影响研究是维

收稿日期:2024-05-03; 修订日期:2024-12-26

基金项目:国家自然科学基金(52378355)

第一作者:张斌(1969—),男,汉族,上海人,副总工程师。研究方向:电力基础设施的技术及管理。E-mail:13817306888@163.com。

\*通信作者:刘飞禹(1976—),男,汉族,湖北天门人,博士,教授。研究方向:地基处理和土动力学。E-mail:lfyju@shu.edu.cn。

护电力安全的重要课题。

当前货运量急剧增加,重型、超重型车辆层出不穷,因此地下管道受交通荷载作用时的变形性能和力学响应受到广泛的研究。Alzabeebee 等<sup>[3]</sup>研究了地下管道受静态和移动交通荷载下的影响。肖成志等<sup>[4]</sup>针对地下管道开展了静载和循环荷载试验,分析了不同因素对管道变形机理以及管周土压力分布规律的影响。Mehrijardi 等<sup>[5]</sup>研究了在土工格室和橡胶-土体混合物制备的沟槽中管道受循环荷载作用下的行为。Huang 等<sup>[6]</sup>研究了埋地钢管在车辆和飞机等多重荷载作用下的力学行为。王丽萍等<sup>[7]</sup>对承插式球墨铸铁供水管道开展了竖向荷载作用下的破损试验和数值模拟。Robert 等<sup>[8]</sup>使用综合现场仪器对直径 660 mm 的铸铁管进行了现场埋管的性能监测。Zhou 等<sup>[9]</sup>研究了埋在纯土和橡胶-土混合物中管道的动力响应。李玉坤等<sup>[10]</sup>建立车-管-土耦合模型,分析了车辆荷载作用下埋地管道的动力响应,得到不同时刻埋地管道的应力分布规律。

软土地基具有高孔隙比、高压缩性、低抗剪强度等特性,在交通荷载作用下,其强度会发生衰减,对地下结构造成显著影响。Cheuk 等<sup>[11]</sup>研究了软黏土海床上管道动态铺设过程及小振幅振动下的管道力学特性。吴奇等<sup>[12]</sup>对扰动海洋原状土的不排水剪切强度及剪切波速的相关性进行了系统分析。慕东霖等<sup>[13]</sup>研究了考虑软土应变软化效应下的桩头位移-反力响应与桩身截面弯矩的发展规律。吴宜鹏等<sup>[14]</sup>在基于 Tresca 屈服准则的理想弹塑性模型中引入软土强度随着塑性应变累积的衰减规律,进而对软土中深埋式大圆筒结构的水平承载力特性进行了系统的数值分析。徐林荣等<sup>[15]</sup>提出不同因素影响的软土累积塑性应变模型,并以此模型为基础进行了交通荷载诱发的软土地基长期沉降计算。程星磊等<sup>[16]</sup>研究了一种可描述循环荷载作用下饱和软土软化特性的增量弹塑性模型。孙苗苗等<sup>[17]</sup>通过空心扭剪试验研究了不同因素下原状软黏土软化指数和累积塑性应变的关系。

虽然软土地基受交通荷载作用的影响已受到一些研究关注,但是对于埋置在软土地基中的电力排管受交通荷载作用下的动力响应特性的研究较少。鉴于此,基于动弹性模量衰减公式编写 USDFLD 子程序,通过考虑软土软化效应和混凝土动力损伤特性,建立软土-电力排管结构非线性动力相互作用的有限元模型,分析软化效应、交通荷载大小、埋置深度对电力排管力学特性的影响。为软土地区的电力排管设计和施工提供科学依据,帮助优化排管埋置深度和应对不同交通荷载的影响。

## 1 电力排管计算模型

采用 ABAQUS 来计算软土地基中电力排管的动力响应。为尽可能增大模型尺寸以减小边界效应的影响,模型整体尺寸确定为 10 m(长)×6 m(宽)×5 m(高)。路面由面层和软土地基组成,其中面层厚度为 0.2 m。电力排管、垫层、路基均采用 C3D8R 实体结构单元,对电力排管及交通荷载作用区域进行网格加密,最终建立的网格数量为 53 285 个,几何模型如图 1 所示。

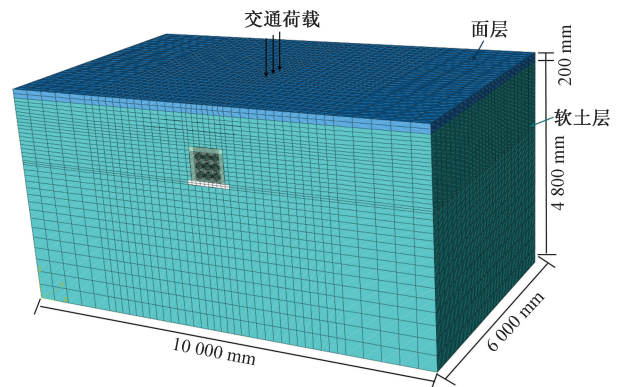


图 1 有限元模型示意图

Fig. 1 Schematic diagram of finite element model

### 1.1 路基路面模型

路基路面模型分为面层和软土路基两部分,其中面层采用线弹性模型来模拟。软土地基采用线弹性模型模拟弹性性质,用扩展的 Drucker-Prager 模型模拟塑性特性,各层参数如表 1 所示。软土地基受交通荷载长期作用下会产生应变软化现象,刘飞禹等<sup>[18]</sup>通过考虑超固结比和偏移应力的影响提出了动弹性模量衰减公式。为考虑交通荷载作用下软土的软化特性,采用文献[18]中的  $E_d-\varepsilon_d$  关系曲线进行数值模拟,其函数形式为

$$E_d = (5.9401 + 0.0265\sigma_s)(-0.0804OCR^2 + 0.7425OCR + 0.3175) \times \varepsilon_d^{(-0.746 + 0.0057\sigma_s)(0.0219OCR^2 - 0.1837OCR + 1.154)} \quad (1)$$

式(1)中: $E_d$ 为动弹性模量; $\sigma_s$ 为初始偏移应力,定义为初始主应力差的大小,取 40 kPa;OCR 为超固结比,取 2; $\varepsilon_d$ 为动应变。

表 1 路基材料属性

Table 1 Properties of roadbed materials

材料	弹性模量/MPa	泊松比	密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	摩擦角/(°)	流应力比	屈服应力/kPa
面层	4 134	0.3	2.49	—	—	—
软土路基	35	0.3	1.85	38	0.892	43.6

## 1.2 电力排管和垫层模型

以9孔典型电力排管为研究对象,排管与垫层计算模型如图2所示。其中,电力排管尺寸为6 m(长)×0.72 m(宽)×0.74 m(高),管孔内径为0.15 m,垫层尺寸为6 m(长)×1.02 m(宽)×0.1 m(高)。电力排管和垫层选取C30混凝土,弹性模量为30 GPa,泊松比为0.27。混凝土在受循环荷载作用下会产生拉伸损伤和压缩损伤,从而导致刚度的退化。因此为精确获得电力排管的动力响应特性,采用混凝土损伤模型(CDP)模拟。CDP模型可以较好地描述混凝土非弹性行为,将损伤弹性与拉伸和压缩塑性相结合,适用于模拟混凝土在循环荷载作用下的破坏情况,材料屈服后应力-应变如表2所示。其中非弹性应变和损伤因子根据材料应力-应变曲线进行计算<sup>[19]</sup>,计算公式为

$$\varepsilon_{in} = \varepsilon - \frac{\sigma}{E} \quad (2)$$

$$d = 1 - \sqrt{\frac{\sigma}{E\varepsilon}} \quad (3)$$

式(3)中: $\varepsilon_{in}$ 为非弹性应变; $\sigma$ 为应力; $\varepsilon$ 为应变; $E$ 为弹性模量; $d$ 为损伤因子。

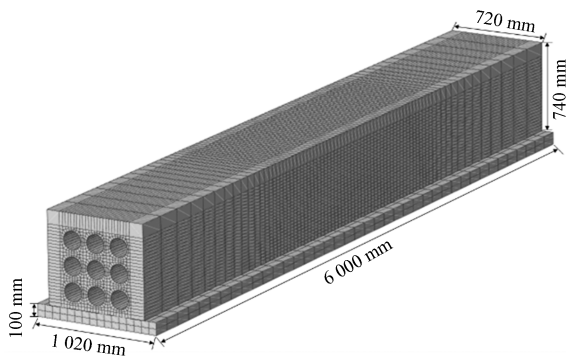


图2 垫层与电力排管计算模型

Fig. 2 Cushion layer and electrical conduit model

## 1.3 交通荷载

在本次研究中,交通荷载作用模拟成正弦激振荷载,压力均匀分布在接触面上,接触面积为2.25 m×1.02 m。为了模拟不同强度的交通荷载,采用荷载幅值为0.35、0.7、1.4、2.1 MPa,分别代表满载50%、满载100%、超载200%、超载300%的交通情况。通过应力控制对路面进行循环加载,加载频率为1 Hz,加载次数为200次,具体的荷载形式如式(4)

$$F(t) = Q_0 + A_0 \sin \omega(t - t_0) \quad (4)$$

式(4)中: $F(t)$ 为路面承受的实际荷载; $Q_0$ 为车辆自身静载; $A_0$ 为车辆附加动荷载; $\omega$ 为圆频率; $t$ 为加载时间; $t_0$ 为初始时间。

表2 C30混凝土CDP模型参数

Table 2 CDP model parameters of C30 concrete

屈服应力 (压)/MPa	塑性应变	屈服应力 (拉)/MPa	塑性应变
4.8	$7.01 \times 10^{-6}$	0.4	$2.08 \times 10^{-7}$
9.2	$2.69 \times 10^{-5}$	1.2	$3.17 \times 10^{-6}$
13.2	$5.84 \times 10^{-5}$	2.1	$9.24 \times 10^{-6}$
17.1	$9.99 \times 10^{-5}$	2.9	$1.80 \times 10^{-5}$
23.8	$2.09 \times 10^{-4}$	2.2	$8.95 \times 10^{-5}$
29.8	$3.49 \times 10^{-4}$	1.7	$1.27 \times 10^{-4}$
35.0	$5.13 \times 10^{-4}$	1.4	$1.62 \times 10^{-4}$
29.4	$1.39 \times 10^{-3}$	1.2	$1.94 \times 10^{-4}$
25.5	$1.87 \times 10^{-3}$	0.8	$2.52 \times 10^{-4}$
19.2	$2.77 \times 10^{-3}$	0.6	$3.32 \times 10^{-4}$
14.9	$3.61 \times 10^{-3}$	0.5	$3.83 \times 10^{-4}$
9.2	$5.53 \times 10^{-3}$	0.4	$4.08 \times 10^{-4}$
6.5	$7.34 \times 10^{-3}$	0.3	$5.55 \times 10^{-4}$
5.1	$9.11 \times 10^{-3}$	0.2	$6.28 \times 10^{-4}$

## 1.4 接触

ABAQUS能够检测模型中的每个接触对,界面相互作用采用面对面接触的方法。由于电力排管的刚度高于土体的刚度,因此将电力排管的表面定义为接触对中的主面。参考Elshesheny等<sup>[20]</sup>的研究,创建非线性接触属性为法向行为和切向行为,模型的切向行为采用库伦摩擦模型来模拟土与电力排管之间的摩擦,摩擦系数取为0.26。法向行为采用硬接触,允许接触分离。

## 2 结果与分析

### 2.1 软化效应的影响

图3为排管沉降随循环次数增加的变化曲线,可以看出,无论是否考虑软化效应,电力排管的竖向位移在加载初期均呈现缓慢增长趋势。随着荷载作用次数增加,排管位移的增长速度明显加快,这与Alotaibi等<sup>[21]</sup>所观察到的现象一致。在满载100%和超载200%的情况下,无论是否考虑土体软化,排管竖向位移的增长速率在初期基本一致,但在75次循环后,考虑土体软化的排管竖向位移的增长速率明显高于不考虑土体软化的情况。这主要是随着循环次数的增加,土体动弹性模量减小,从而降低了土体受交通荷载作用后抵抗变形的能力。在交通荷载循环200次后,考虑软土的软化效应下受超载200%和满载100%情况时,排管竖向永久位移分别为38.9 mm和20.8 mm,两者的位移差值为18.1 mm。比较软化与不软化的情况,这一值增加了53.5%,因此软土的软化效应对管道受交通荷载下的沉降影响显著。

图4为荷载作用中心下的地基土竖向动应力分

布情况。交通荷载制作用下竖向应力在面层处衰减较快,面层底部竖向应力分别为 499.9、540.3、808.3、860.4 kPa。在软土地基区域,排管上方的竖向应力随深度先增加后减小,考虑软化情况下竖向应力的增加较大。相较于未考虑软化效应的情况,考虑软化效应情况下作用于排管顶部的竖向应力较大,可见交通荷载在考虑软化效应情况下作用与排管上方的竖向应力更大。

图 5 为排管底部轴向应变分布云图,可以看出管顶的应变分布不均匀,考虑软土软化效应与否对管底应变分布的影响较大。在不考虑土体软化的情况下,距排管中心 275 mm 范围内的排管底部轴向应变值较小,随着距离的增大,管道底部的应变值先迅速增大,然后逐渐减小。这主要是混凝土排管底部受拉应力控制,在管道底部中心处由于拉伸损伤系数的显著提高,导致在底部出现多条应变集中区域。从应变云图(图 5)中可以看出,混凝土底部的最大应变主要集中在管道中心两侧。当考虑土体软化效应时,排管底部的最大应变值明显大于

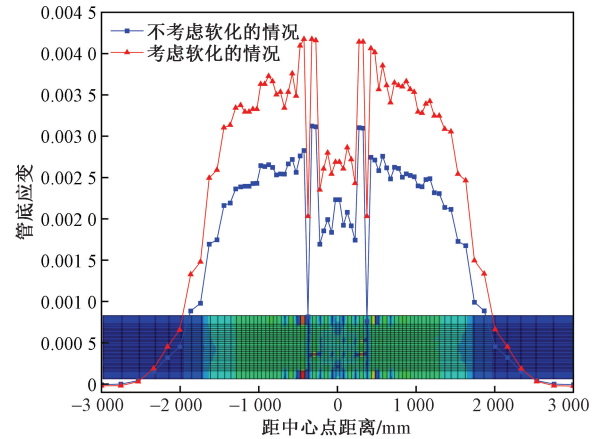


图 5 满载 100% 情况下管底轴向应变分布

Fig. 5 Distribution of axial strain at the bottom of the electrical conduit under 100% full load

不考虑软化的情况,相比不考虑软化时,增大了 1.3 倍。同时,管道底部应变集中处的应变差值也明显增加,达到 0.001 8,是不考虑软化时的 1.2 倍。

图 6 为排管底部的拉伸损伤分布云图,可以看出,最大损伤值从中心位置开始,逐渐向两侧扩展。在不考虑土体软化效应的情况下,排管底部的塑性损伤发展区域较小,仅限于距离管底 80 mm 范围内,最大损伤值为 0.804。在考虑土体软化效应情况下,排管底部的塑性损伤发展区域明显增大,底部正中心区域增长至 480 mm 处,并向两侧扩展,最大拉伸损伤值为 0.928,相较于不考虑土体软化的情况增大了 13.3%。图 7 比较了考虑与不考虑软化效应下的排管拉伸损伤与压缩损伤,可以看出考虑土体软化效应后的电力排管底部受交通荷载的影响较大,管道顶部受交通荷载的影响较小。同时管道受交通荷载过程中,管道的拉伸损伤明显大于压缩损伤,因此在对危险区域进行加固时可以着重于拉伸裂缝的处理。

### 2.2 荷载幅值的影响

图 8 为不同交通荷载作用下的电力排管沉降时程曲线,随着交通荷载的增大,排管沉降值增加。在循环 200 次后的最大沉降值从 13.52 mm 增大至 48 mm,其中不同荷载值下的沉降值分别增大了 7.28、11.2、16 mm。这是由于随着循环次数的增加,在较大的交通荷载情况下排管产生较大的拉、压塑性应变,局部区域的损伤系数不断增大,进而导致电力排管的弹性刚度下降,竖向位移和变形速率也随着循环次数的增加越来越大。

图 9 为不同交通荷载作用下的排管底部轴向应变曲线,应变值在管底呈现中间大两边小的分布,随着交通荷载的增大,排管底部的应变值显著增

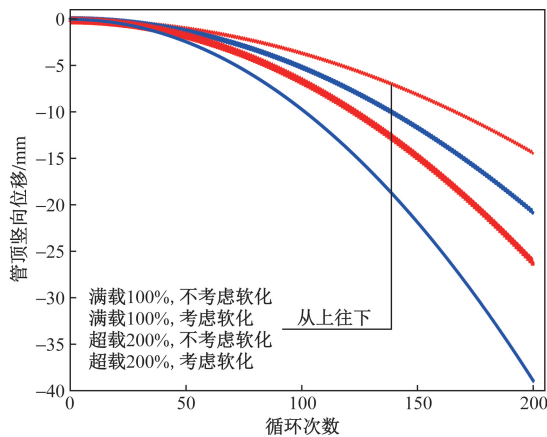


图 3 电力排管沉降时程曲线

Fig. 3 Time history curve of electrical conduit settlement

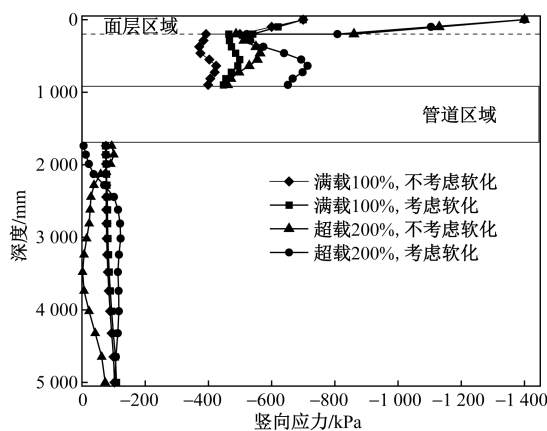


图 4 地基土竖向动应力随深度分布曲线

Fig. 4 Vertical dynamic stress distribution curve of foundation soil with depth

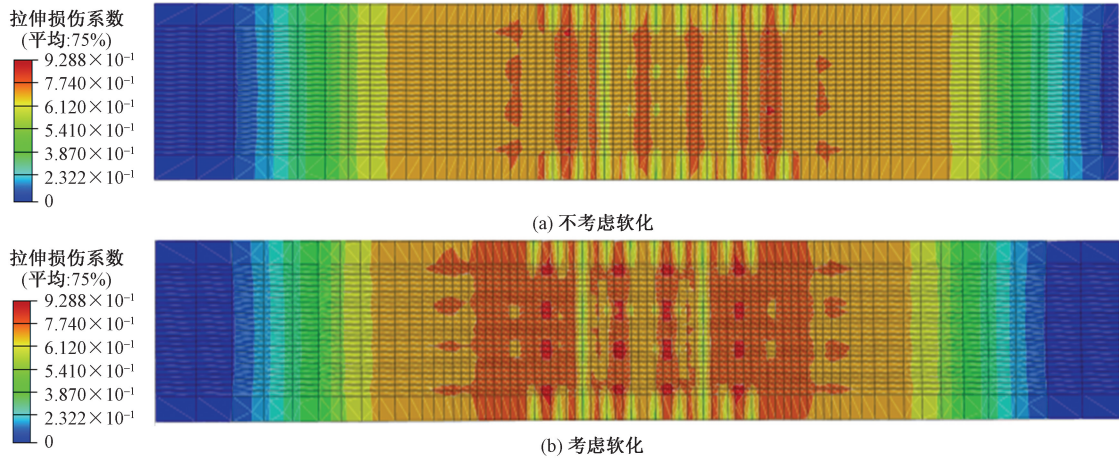


图 6 满载 100% 情况下管底拉伸损伤

Fig. 6 Tensile damage at the bottom of the electrical conduit under 100% full load

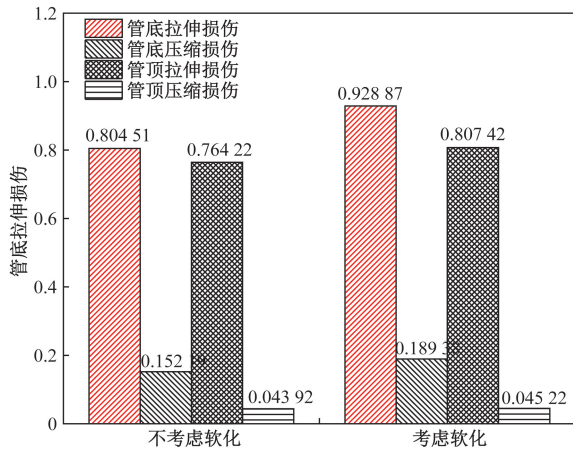


图 7 满载 100% 情况下排管损伤系数

Fig. 7 Damage coefficient of electrical conduit under 100% full load

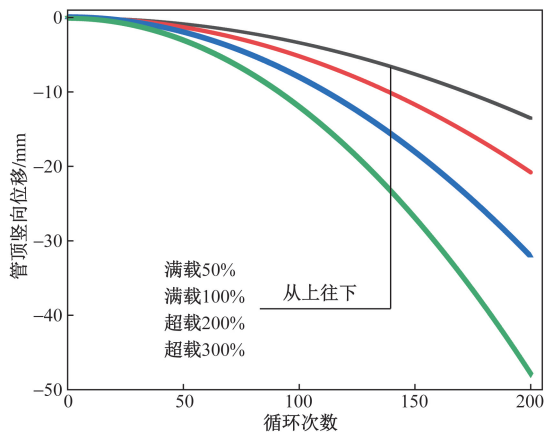


图 8 不同交通荷载下管道沉降时程曲线

Fig. 8 Time history curve of electrical conduit line settlement under different traffic loads

加。当交通荷载为满载 50% 时, 应变值较小, 最大应变值仅为 0.001 55, 且应变值在中间区域分布较为均匀, 应变集中现象不明显。当交通荷载为满载

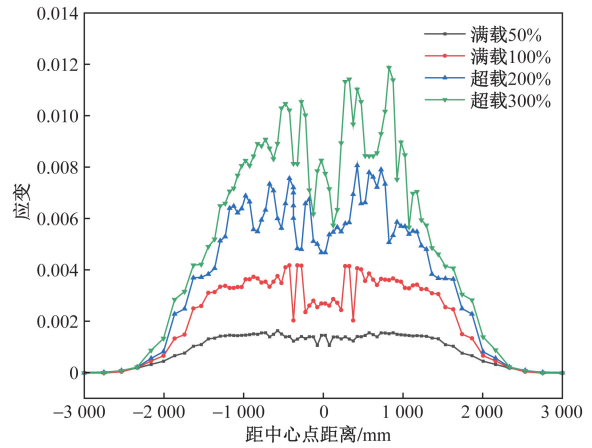


图 9 不同交通荷载作用下管底轴向应变分布

Fig. 9 Distribution of axial strain at the bottom of electrical conduit under different traffic loads

100% 时, 最大应变值增加至 0.004 18, 距中心点 425 mm。同时, 排管底部的应变呈对称分布, 有 4 处明显的应变集中区域, 最大应变差值为 0.002 15。当交通荷载为超载 200% 时, 排管底部的应变值继续增大, 呈非对称分布, 并有八处应变集中区域, 最大应变差值为 0.003 23, 是满载 100% 情况下的 1.5 倍。当交通荷载为超载 300% 时, 排管底部的最大应变值达到 0.011 87, 有八处应变集中区域, 最大应变差值为 0.003 58, 是满载 100% 情况下的 1.67 倍。

如前所述, 电力排管在加载过程中承受显著的拉伸应变, 因此图 10 对不同交通荷载下管道底部的拉伸损伤分布进行比较。由图 10 可知, 拉伸损伤系数主要集中在中心区域, 两侧最小, 满载 50% 时的最大拉伸损伤系数为 0.814, 满载 100% 时的最大拉伸损伤系数为 0.928, 超载 200% 和超载 300% 时的最大拉伸损伤系数都为 0.979。同时, 高损伤系数

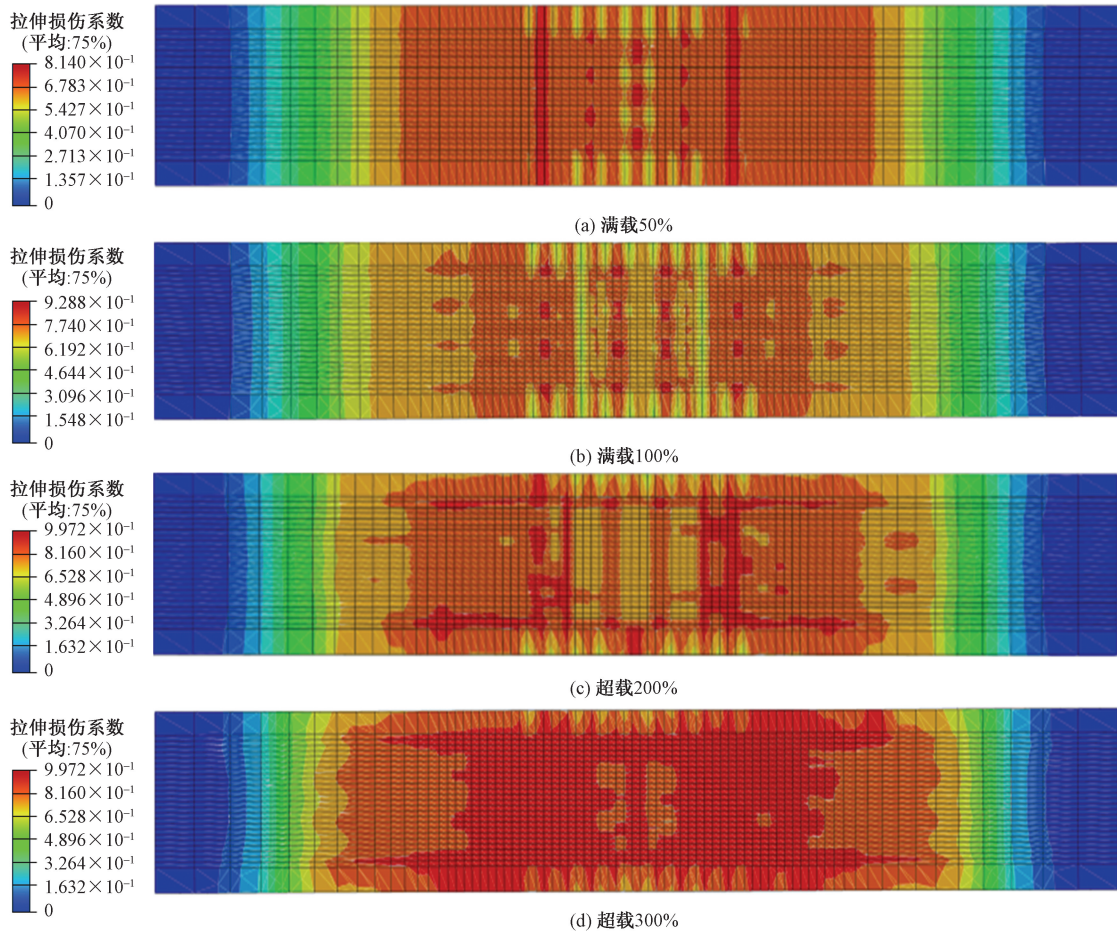


图 10 不同交通荷载下管道底部拉伸损伤分布

Fig. 10 Distribution of tensile damage at the bottom of electrical conduit under different traffic loads

区域并未均匀分布在管道中心,而是在中心点附近存在较低损伤系数的区域,这主要是垫层的保护,使得底部中心处并未全部达到最大损伤系数。

图 11 为满载 100% 作用下的排管断面塑性应变分布云图。可以看出,排管的塑性应变从上往下逐渐增大,排管底部两侧存在明显的高应变区域。在孔洞附近,竖直方向上的塑性应变明显小于水平方向上的塑性应变。这主要是由于当交通荷载作用于地面时,土体的变形会影响到管道,特别是管道侧面会向水平方向变形并与土体发生挤压。因此,在交通荷载多次作用后,孔洞的水平方向会产生较高的塑性应变。

图 12 为不同交通荷载作用下正中心的排管孔洞塑性应变分布,可以看出,塑性应变在孔洞顶部和底部较小,并向两侧逐渐增大。当交通荷载从满载 50% 增加至满载 100% 时,管周环向塑性应变增加较少,最大塑性应变为满载 50% 的 2.74 倍。当交通荷载达到超载 200% 和超载 300% 时,排管的管孔环向塑性应变增加显著,最大塑性应变分别达到满载 50% 的 7.17 倍、10.1 倍。

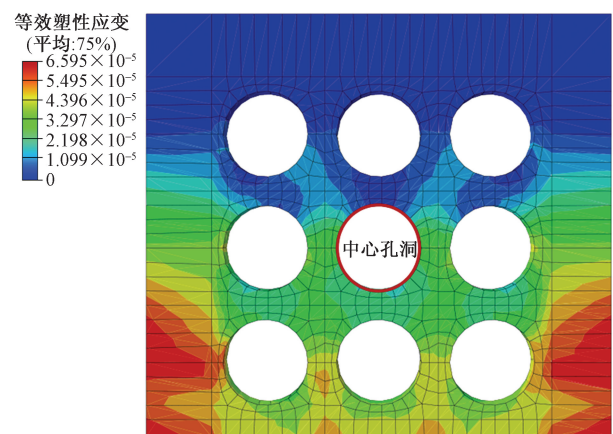


图 11 满载 100% 下排管塑性应变分布

Fig. 11 Plastic strain distribution of the electrical conduit at 100% full load

### 2.3 埋置深度的影响

图 13 为满载 100% 情况下不同电力排管埋深的沉降时程曲线,可以看出,随着埋深的增加,相同循环次数下的沉降量减少。在埋深 800 mm 情况下,最大排管竖向位移为 28.7 mm,相较于埋深

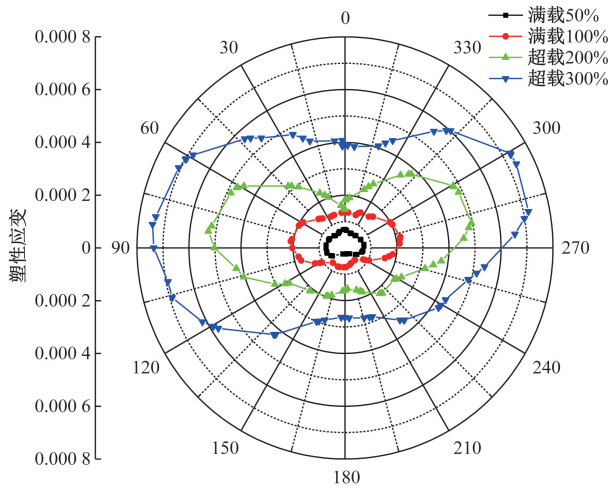


图 12 不同交通荷载作用下排管孔洞塑性应变

Fig. 12 Plastic strain of electrical conduit openings under different traffic loads

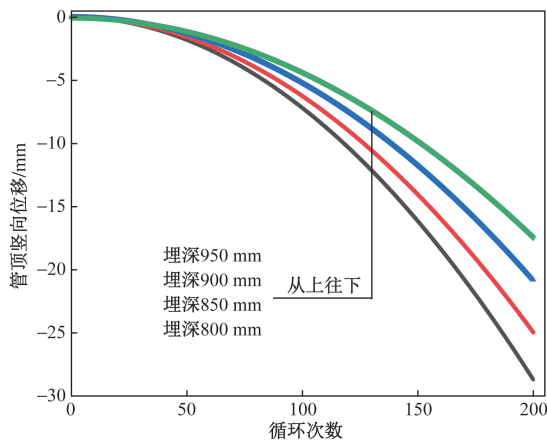


图 13 不同埋置深度下管道沉降时程曲线

Fig. 13 Time history curve of electrical conduit settlement under different burial depths

850、900、950 mm 的情况分别增加了 13%、27.5%、39.1%。这表明增加埋深可以有效降低地下埋管的沉降。

图 14 为不同排管埋深下的排管底部轴向应变曲线,可以看出,随着排管埋设深度的增加,排管底部最大应变值减小。当埋设深度为 950 mm 时,应变较小,最大应变值仅为 0.001 65,在距中心点 525 mm 范围内,共有 5 处应变集中现象。当埋设深度为 900 mm 时,最大应变增加至 0.004 18,且出现应变集中现象的区域扩大至距离中心点 1 023 mm 处。当埋设深度为 850 mm 时,排管底部应变值继续增大,且应变集中处的应变差值明显增大,并存在八处应变集中区域,最大应变差值为 0.002 47,是埋设深度 950 mm 的 3.9 倍。当埋设深度为 800 mm 时,排管底部最大应变达到 0.008 34,存在 9 处应变集中区域,最大应变差值为 0.003 27,是埋设深度

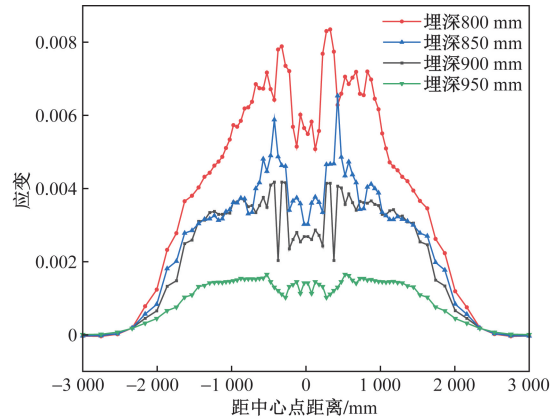


图 14 不同埋置深度下管底轴向应变分布

Fig. 14 Distribution of axial strain at the bottom of the electrical conduit under different burial depths

950 mm 的 5.1 倍。同时随着电力排管埋深的增加,应变集中区域的宽度增加。尽管电力排管埋深改变,管底应变基本保持对称分布,并未出现超载时的非对称分布。

图 15 为不同排管埋设深度下的底部拉伸损伤分布云图。可以看出,拉伸损伤系数主要集中在中心区域,在两侧最小,埋深 800 mm 时的最大拉伸损伤系数为 0.979,埋深 850 mm 时的最大拉伸损伤系数为 0.975,埋深 900 mm 和埋深 950 mm 时的最大拉伸损伤系数分别为 0.928 和 0.852。

图 16 为不同埋设深度下正中心的排管孔洞塑性应变分布,可以看出,塑性应变在孔洞顶部和底部较小,并向两侧逐渐增大。当埋设深度从 950 mm 减小至 900 mm 时,管周环向塑性应变增加较少,最大塑性应变为埋设深度 950 mm 的 2.22 倍。当埋设深度达到 850 mm 和 800 mm 时,排管的管孔环向塑性应变增加显著,最大塑性应变分别达到埋设深度 950 mm 的 3.0 倍、4.64 倍。

### 3 结论

(1) 软土的软化效应对电力排管受交通荷载作用下的沉降有显著影响。考虑土体软化效应后,电力排管底部的拉伸损伤明显增加,而管道顶部受交通荷载的影响较小。

(2) 随着交通荷载增加,电力排管的沉降值与沉降速率显著增大,排管底部的应变由对称分布转为不对称分布,应变集中区域增多。排管孔洞的塑性应变在腰部位置较大,在顶部和底部较小,最大应变值随交通荷载的增大而增大。

(3) 增加电力排管的埋深可以显著降低交通荷载对排管的影响,当埋置深度从 800 mm 增加至 950 mm,电力排管的沉降值减少了 39%。

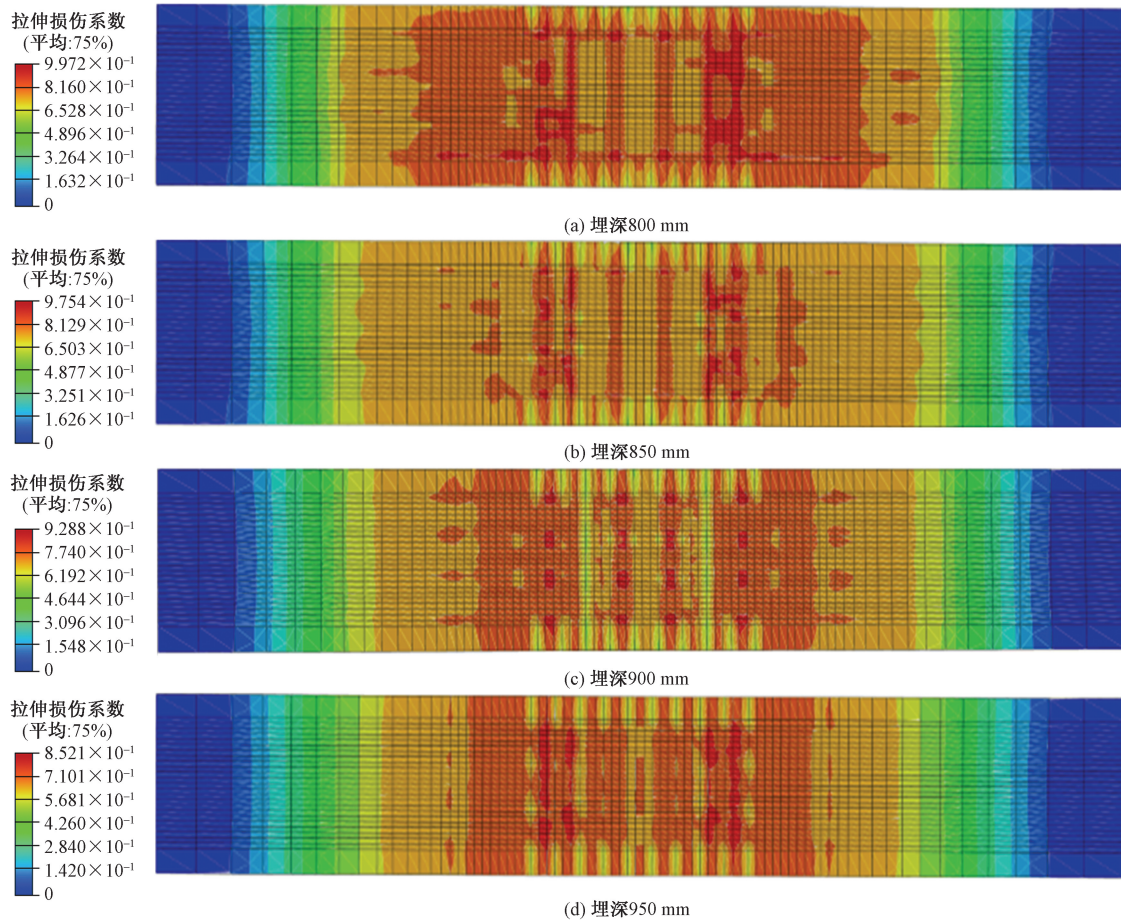


图 15 不同埋置深度下管道底部拉伸损伤分布

Fig. 15 Distribution of tensile damage at the bottom of electrical conduit under different burial depths

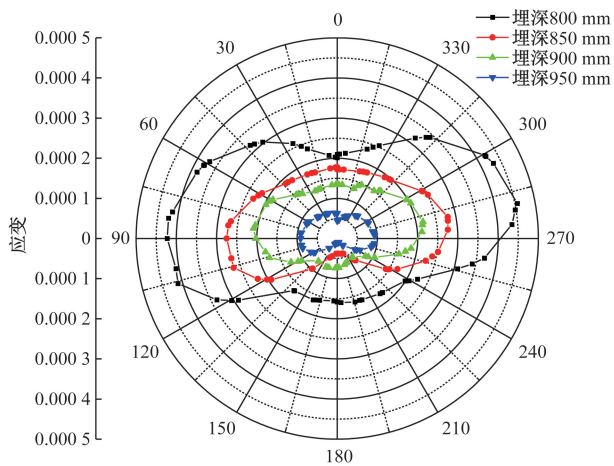


图 16 不同埋置深度下排管孔洞塑性应变

Fig. 16 Plastic strain of electrical conduit openings under different burial depths

参 考 文 献

[1] 喻文昭, 朱鸿鹄, 王德洋, 等. 埋地管道竖向隆起破坏研究综述[J]. 防灾减灾工程学报, 2023, 43(2): 189-200.  
Yu Wenzhao, Zhu Honghu, Wang Deyang, et al. A review of re-

search on vertical uplift failure of buried pipelines[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2023, 43(2): 189-200.  
[2] 梁爱武, 刘庭金, 王彦峰, 等. 高压电缆排管变形控制标准破坏性试验研究[J]. 地下空间与工程学报, 2021, 17(3): 712-719.  
Liang Aiwu, Liu Tingjin, Wang Yanfeng, et al. Destructive test study on the deformation control standard of concrete duct for high-voltage cables[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2021, 17(3): 712-719.  
[3] Alzabeebe S, Chapman D N, Faramarzi A. A comparative study of the response of buried pipes under static and moving loads[J]. Transportation Geotechnics, 2018, 15: 39-46.  
[4] 肖成志, 王嘉勇, 何晨曦. 静/动载作用下埋地管道力学性能的试验分析[J]. 地下空间与工程学报, 2019, 15(3): 747-754.  
Xiao Chengzhi, Wang Jiayong, He Chenxi. Experimental study on mechanical performance of buried pipes under static and cyclic loading[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2019, 15(3): 747-754.  
[5] Mehrjardi G T, Tafreshi S N M, Dawson A R. Numerical analysis on buried pipes protected by combination of geocell reinforcement and rubber-soil mixture[J]. International Journal of Civil Engineering, 2015, 13(2): 90-104.

- [6] Huang C W, Chen J J, Sun Y. Mechanical simulation and calculation methodology of buried steel pipes under multiple loads[J]. *Case Studies in Construction Materials*, 2022, 17(1): e01662.
- [7] 王丽萍, 张宛静, 赵帅, 等. 竖向荷载作用下承插式球墨铸铁供水管道接口破损试验与数值模拟研究[J]. *防灾减灾工程学报*, 2023, 43(2): 232-239.  
Wang Liping, Zhang Wanjing, Zhao Shuai, et al. Experiment and numerical simulation study on socket and spigot joint damage of ductile iron water supply pipeline under vertical loading[J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2023, 43(2): 232-239.
- [8] Robert D J, Chan D, Rajeev P, et al. Effects of operational loads on buried water pipes using field tests[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2022, 124: 104463.
- [9] Zhou E Q, Cui L, Zuo X, et al. Dynamic behaviour of pipe protected by rubber-soil mixtures[J]. *Geosynthetics International*, 2023, 30(3): 285-295.
- [10] 李玉坤, 裴晨亮, 周鹏, 等. 车辆荷载作用下埋地管道动力响应分析[J]. *科学技术与工程*, 2023, 23(10): 4185-4193.  
Li Yukun, Pei Chenliang, Zhou Peng, et al. Analysis of dynamic response of buried pipeline under vehicle load[J]. *Science Technology and Engineering*, 2023, 23(10): 4185-4193.
- [11] Cheuk C Y, White D J. Modelling the dynamic embedment of seabed pipelines[J]. *Géotechnique*, 2011, 61(1): 39-57.
- [12] 吴奇, 郭力嘉, 张鑫磊, 等. 海上风电平台地基土工程力学特性试验研究[J]. *防灾减灾工程学报*, 2023, 43(4): 666-673.  
Wu Qi, Guo Lijia, Zhang Xinlei, et al. Experimental study on engineering mechanical characteristics of foundation marine soils of offshore wind power platform[J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2023, 43(4): 666-673.
- [13] 慕东霖, 田英辉, 王乐, 等. 考虑软土软化效应时单桩基础水平循环受荷的有限元数值模拟[J]. *岩土工程学报*, 2022, 44(4): 740-748.  
Mu Donglin, Tian Yinghui, Wang Le, et al. Finite element numerical simulation of single pile under horizontal cyclic loading considering softening effect of soft soil[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2022, 44(4): 740-748.
- [14] 吴宜鹏, 范庆来, 任增乾, 等. 考虑软土应变软化效应的深埋式大圆筒承载性状分析[J]. *防灾减灾工程学报*, 2022, 42(4): 859-865.  
Wu Yipeng, Fan Qinglai, Ren Zengqian, et al. Bearing behavior of deeply-embedded large-diameter cylindrical structure considering strain softening effect of soft clay[J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2022, 42(4): 859-865.
- [15] 徐林荣, 陈昀灏, 商拥辉, 等. 基于力学-经验模型的交通荷载作用下软基长期沉降计算[J]. *长安大学学报(自然科学版)*, 2021, 41(5): 1-10.  
Xu Linrong, Chen Yunhao, Shang Yonghui, et al. Long-term settlement calculation of soft soil foundation under traffic load based on mechanical-empirical model[J]. *Journal of Chang'an University (Natural Science Edition)*, 2021, 41(5): 1-10.
- [16] 程星磊, 王建华. 考虑循环软化特性的饱和软土弹塑性本构关系研究[J]. *岩土力学*, 2015, 36(3): 786-794.  
Cheng Xinglei, Wang Jianhua. Research on elastoplastic constitutive relation for soft clay considering cyclic softening[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2015, 36(3): 786-794.
- [17] 孙苗苗, 虞健刚, 何绍衡, 等. 交通荷载作用下考虑累积塑性应变的饱和软黏土应变软化特性研究[J]. *铁道学报*, 2023, 45(4): 148-156.  
Sun Miaomiao, Yu Jiangang, He Shaoheng, et al. Research on strain softening characteristics of saturated soft clay considering accumulative plastic strain under traffic load[J]. *Journal of The China Railway Society*, 2023, 45(4): 148-156.
- [18] 刘飞禹, 蔡袁强, 徐长节, 等. 循环荷载下软土动弹性模量衰减规律研究[J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2008, 42(9): 1479-1483.  
Liu Feiyu, Cai Yuanqiang, Xu Changjie, et al. Degradation of dynamic elastic modulus of soft clay under cyclic loading[J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2008, 42(9): 1479-1483.
- [19] 聂建国, 王宇航. ABAQUS中混凝土本构模型用于模拟结构静力行为的比较研究[J]. *工程力学*, 2013, 30(4): 59-67.  
Nie Jianguo, Wang Yuhang. Comparison study of constitutive model of concrete in ABAQUS for static analysis of structures[J]. *Engineering Mechanics*, 2013, 30(4): 59-67.
- [20] Elshesheny A, Mohamed M, Nagy N M, et al. Numerical behaviour of buried flexible pipes in geogrid-reinforced soil under cyclic loading[J]. *Computers and Geotechnics*, 2020, 122(3): 103493.
- [21] Alotaibi E, Omar M, Shanableh A W, et al. Geogrid bridging over existing shallow flexible PVC buried pipe-experimental study[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2021, 113: 103945.